

Identificació dels *nius de tempestes* a partir d'un model meteorològic.

Autor: Antoni Conde i Iglesias

Supervisor: Bernat Codina Sánchez, bernat.codina@ub.edu

Facultat de Física, Universitat de Barcelona, Diagonal 645, 08028 Barcelona, Catalunya, Espanya.*

Resum: L'objectiu central d'aquest treball és identificar zones de Catalunya en les quals les tempestes convectives són propenses a l'aparició reiterada i prematura; és a dir aconseguir reconèixer els populars *nius de tempesta*. Per fer-ho, es parteix de les dades de la Xarxa de Descàrregues Elèctriques (XDDE) del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC). Amb aquesta informació es crea un patró espacial de densitat de llamps en el territori d'estudi. S'acota el treball al període comprès entre els mesos d'abril i setembre des de l'any 2016 fins el 2020. D'aquesta manera es localitzen diferents zones amb alta densitat de llamps, destacant l'àrea del Ripollès. Després, s'utilitza el WRF-ARW per tal de recrear aquest patró climàtic, tractant d'identificar l'existència d'aquestes zones favorables a la iniciació de les precipitacions associades a les tempestes que s'han esmentat. Un cop assajades les simulacions amb el model, es filtren les sortides emprant índexs termodinàmics clàssics per a seleccionar la precipitació d'origen convectiu. Finalment s'analitzen els processos meteorològics que afavoreixen l'existència dels *nius de tempesta* dels Pirineus Orientals. Com a mecanismes mesoescalars recurrents es suggereixen la convergència de vents en capes baixes deguda a l'orografia i les circulacions d'origen marítim canalitzades; ambdós es produeixen en presència d'altres humitats i una mínima quantitat d'aigua disponible. A més a més, s'insinua que la font elevada de calor a l'atmosfera lliure és un factor més a tenir en compte com a mecanisme precursor de les precipitacions primerenques analitzades.

I. INTRODUCCIÓ

En la cultura popular s'utilitza el terme de *nius de tempesta* per referir-se a zones en les quals s'afavoreix l'aparició reiterada i prematura de tempestes. Aquestes tenen el seu origen en la denominada convecció humida profunda (*deep moist convection*, DMC) i s'inicia comunament al llarg dels límits de masses d'aire, com ara fronts sinòptics, línies seques, fronts de ràfega (*outflow boundaries*) i brises marines. Les tempestes convectives també poden iniciar-se per circulacions orogràfiques mogudes per una font elevada de calor (*elevated heating*), terrenys elevats o per una elevació forçada per ones gravitatòries conduïdes, actuant en cada cas com un efecte dispar (Markowski i Richardson 2011). Aquesta convecció s'entén com aquella on està present forts corrents ascendents (superiors als 10 m/s), que s'estenen per la major part de la troposfera amb una secció horitzontal entre 10 i 100 km² i que poden tenir associades un conjunt de fenòmens meteorològics adversos com: forts vents, calamarsa, precipitacions intenses, tornados i/o descàrregues elèctriques (Martín León et al. 2007).

En l'estudi d'aquesta convecció profunda, s'ha de tenir present la microfísica de núvols associada a les condicions en les quals es produeix. Al donar-se corrents ascendents molt intensos, a l'interior de les tempestes les partícules precipitants poden trobar-se tant en estat líquid com sòlid, formant-se en condicions de temperatures molt baixes a base de minúsculs cristalls de gel i gotes d'aigua en subfusió fins els -40 °C. Es tracta, per tant, de

precipitació de tipus fred ¹. Per una altra banda, pel que fa als llamps, aquest tipus de precipitació sol anar acompanyada d'un gran nombre de descàrregues, ja que estan associats a processos molt marcats per l'electrificació i estan presents tant els llamps núvol-núvol (NN) com els núvol-terra (NT) (Rigo et al. 2008).

En el cas que ens ocupa, ens interessa utilitzar aquelles variables disponibles que ens permetin identificar la zona d'origen de les tempestes convectives, essent les primeres descàrregues elèctriques que apareixen, un bon candidat. Segons diferents estudis esmentats en l'informe de Rigo et al. (2008), quan el núvol de tempesta assoleix unes certes dimensions, comencen aparèixer descàrregues elèctriques en el seu interior, els llamps NN. Per contra, l'activitat elèctrica produïda pels llamps NT està desplaçada en el temps respecte a l'activitat dels NN. Així i tot, els NT són els majorment utilitzats en els treballs de densitat de llamps, com és el cas dels realitzats de forma anual pel Servei Meteorològic de Catalunya (SMC).

Els mapes ceràunics són el resultat gràfic del tractament de les dades corresponents a la detecció de descàrregues elèctriques. Concretament, s'utilitza el nivell ceràunic (dies de tempesta) on es representen el nombre de dies de l'any on s'han produït tempestes en una determinada àrea preestablerta. A partir d'aquests documents tècnics anuals (a vegades estacionals) es poden arribar a determinar patrons geogràfics en el territori on es realitzen (Météo France 2021, Núñez Mora et al. 2019, Servei Meteorològic de Catalunya 2019).

Una altra opció per a l'estudi de les zones amb tempestes primerenques és l'utilització d'un model

* Adreça electrònica: toniconde96@gmail.com

¹ La pluja freda també sol ser sinònim de la precipitació formada a partir del procés de Wegner-Bergeron-Findeisen.

meteorològic, per tal d'intentar reproduir el patró geogràfic construït a partir de les dades observacionals de llamps. En aquest cas, s'ha de tenir en ment que l'atmosfera terrestre és un sistema complex on es produeixen interaccions no lineals i superposicions de processos en un ampli ventall d'escala, tant temporals com espacials. Pel que en el moment d'incloure aquests processos en un model de predicció meteorològica, s'ha de tenir present que no es disposa de les solucions analítiques de les equacions que governen l'atmosfera. A més a més, depenent de l'escala i el propòsit en què es treballi pot resultar beneficiós una simplificació d'aquestes. Llavors, la integració de les equacions només poden reproduir el comportament de l'atmosfera que està definit pel pas de malla. La part dinàmica del model resoldrà les equacions en la malla que s'hagi configurat en el preprocessador, negligint els termes que s'hagi considerat prèviament.

Ara bé, les interaccions que existeixen no només es donen en una mateixa escala, sinó que també es produeixen entre diferents escales. És a dir, el que succeeix a la petita escala acabarà afectant en algun moment a les escales majors. Per poder incloure els processos no resolts de forma explícita pel model es fan servir expressions empíriques que modifiquen les tendències dels camps meteorològics, conegudes com a parametritzacions. Es poden dividir en dos grans grups principals: les parametritzacions d'escala més petita (*sub-grid parameterizations*, en anglès) i les d'escala de la malla (més conegudes com a *grid-scale parameterizations*). Les primeres són aquelles que reneixen compte de processos que passen a escales menors al pas de malla utilitzat com la convecció dels cúmuls, mentre que les segones s'incorporen per falta de descripció en les equacions primitives com la microfísica de núvols (Coiffier 2011).

A l'hora de fer servir un model meteorològic s'ha de considerar per a cada procés físic, si s'ha de parametritzar, o per contra, no resulta necessari ja que es resol de forma explícita. Depenent de l'escala, aquesta decisió resulta complexa, a l'existir un rang de resolució pel model on resulta ambigu si s'ha de parametritzar o no cada procés físic. Aquest interval de resolució es coneix com la zona grisa del model de predicció numèrica (*NWP gray zone*), i és diferent per a cada procés físic. Per exemple, en el cas de la zona grisa de la convecció per cúmuls (esquema de convecció o de cúmuls), aquesta zona grisa és més ample que la que existeix per a altres parametritzacions, com és el cas de la turbulència. Això pot comportar problemes en la predicció meteorològica, ja que es pot donar el cas que alguns dels processos parametritzats es comencin a resoldre parcialment, donant-se el fenomen de doble recompte (més conegut com a *double counting*), fent que hi hagi una sobreestimació d'alguns camps, com és el cas de la precipitació acumulada (Jeworrek et al. 2019, Palmer i Hagedorn 2006).

Amb aquestes idees en ment, aquest treball té com a objectiu principal identificar les zones en les

quals s'afavoreix l'aparició primerenca i reiterada de les tempestes a la regió de Catalunya. Per fer-ho, es tractaran les dades de la Xarxa de Descàrregues Elèctriques (XDDE) del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) per tal d'obtenir un patró climatològic. Posteriorment, per mitjà del WRF-ARW s'intentarà reproduir el patró més semblant a l'obtingut prèviament amb les dades experimental. Per fer-ho, s'utilitzarà la configuració adequada a la convecció profunda. També es pretén suggerir els mecanismes que estan darrere dels mapes ceràunics en el territori d'estudi.

II. DADES I METODOLOGIA

A. Àrea d'estudi

Aquest estudi està centrat a Catalunya, una regió situada al nord-est de la península Ibèrica. Com es visualitza en la Fig. 1, presenta una topografia complexa on les unitats de relleu s'estenen més enllà dels límits administratius marcats, pel que en la investigació realitzada s'haurà de tenir cura de les zones limítrofes. En qualsevol cas, es diferencien tres grans unitats de relleu. Per una banda està el Sistema Pirinenc, localitzat a la zona més septentrional, essent la formació muntanyosa dominant. Està dividida en dues unitats diferenciades: el Pirineu axial i el Prepirineu. Per una altra banda es troba el Sistema Mediterrani constituït per un conjunt de serralades paral·leles a la costa catalana, a grans trets s'hi localitzen les Serralades Prelitoral i Litoral. Després, a la part més oriental de la depressió de l'Ebre està la Depressió Central. Finalment, com a confluència dels Pirineus, la Serralada Prelitoral i la Depressió Central es troba la Serralada Transversal (Lluís 2007).

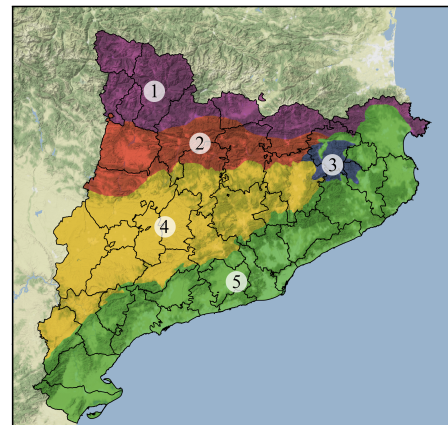


Figura 1: Mapa de l'àrea d'estudi en la localització dels *nius de tempesta*. Es diferencien i s'enumeren les diferents unitats de relleu principals. De l'1 al 5 trobem: Pirineu, Prepirineu, Serralada Transversal, Depressió Central i Sistema Mediterrani.

B. Tractament de les dades de la xarxa XDDE

Les dades observacionals de llamps han estat proporcionades per la Xarxa de Detecció de Descàrregues Elèctriques (XDDE) del SMC. Aquesta xarxa està formada en l'actualitat per quatre detectors Vaisala LS800 localitzats als municipis de Begues (el Baix Llobregat), d'Amposta (el Montsià), de Castellnou de Seana (el Pla d'Urgell) i de Muntanyola (a la comarca d'Osona). La distribució descrita dels detectors permet una bona cobertura a Catalunya (Fig. 2). El conjunt de detectors permeten disposar d'una eficiència teòrica de la xarxa del 90% i una real superior al 83% (Pineda et al. 2011).

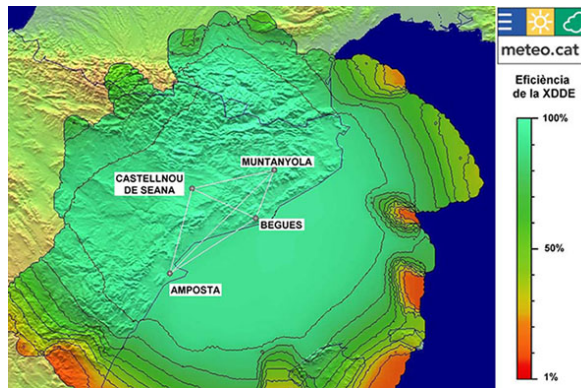


Figura 2: Mapa de la disposició dels sensors de la XDDE i estimació teòrica de la eficiència de detecció de la xarxa del SMC. Font: Pineda et al. (2011).

Les variables disponibles en aquestes dades incorporen informació temporal, geogràfica, tècnica de la xarxa i física, tant dels llamps NT com dels NN per a les diferents descàrregues elèctriques detectades per a la xarxa que s'ha descrit. D'aquesta manera, es podrà fer un tractament tenint en compte els dos tipus de llamps, centrant-nos amb els NN, tal com s'ha introduït prèviament.

No obstant, tot i que en general els llamps que es produeixen en un dia de tempesta se solen representar amb valors discrets per mitjà de punts (o de símbols, com les creus), a l'hora de fer un estudi estadístic resulta necessari l'ús de nous paràmetres que són més adequats per a la seva representació espacial, com és la freqüència o densitat de descàrregues (Pineda et al. 2011).

Per tant, per tal de poder definir aquests paràmetres, resulta imprescindible establir una unitat de superfície de referència. Depenent de la definició que es faci, els resultats poden variar substancialment. Si es fan servir en l'estudi les dades d'una estació meteorològica automàtica (EMA), es podria donar el cas que durant tots els anys en què tenim dades no hagués caigut cap llamp. S'evidencia, per tant, que cal utilitzar dades espacials no puntuals. Ara bé, s'ha de prendre en consideració que la probabilitat que caigui un llamp anirà

creixent a mesura que anem augmentant la unitat de referència. No és el mateix prendre com a referència un quilòmetre quadrat o bé tot Catalunya, per posar dos exemples extrems dins de l'opció no puntual de dades. En l'últim cas ens assegurem que estiguin incloses totes les dades de descàrregues, però no ens servirà per a la localització dels *nius de tempestes* alhora que es perdrà la informació climàtica. Es fa necessària la obtenció d'un compromís entre els dos casos extrems.

Com a primera aproximació, es pot fer servir la mecànica clàssica d'ones per a estimar la distància a la qual es pot sentir un tro, electrometeor que segueix el llamp. Varia segons l'altura en què es generi el tro i les condicions atmosfèriques, però rarament s'escoltarà més enllà dels 25 km (Fleagle 1949). D'aquesta manera s'estableix un límit superior.

A més a més, per mitjà dels resultats d'estudis realitzats on es calculen densitats de llamps es pot establir el límit inferior. En particular, amb dades de llamps de 5 anys i amb una incertesa del 20% en els resultats, la superfície de referència que s'ha de fer servir ha de tenir com a mínim 16 quilòmetres de costat (Rigo et al. 2008). És per això que s'estableixen per aquest estudi cel·les de $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$ corresponents a uns 20 km de costat. També s'acota espacialment de 0° a 3.5°E i de 40°N a 43°N . S'ha considerat augmentar latitudinalment respecte l'àrea pròpia d'estudi, per evitar la pèrdua parcial d'informació. Establertes les condicions pel tractament de les variables aleatòries, com són els electrometeors, es procedeix al seu tractament pròpiament, per tal de poder trobar les zones propenses a tempestes en el territori d'estudi.

Es comença amb un filtratge de les dades, tenint present que aquestes ja han set tractades prèviament pel SMC, ometent aquells llamps detectats en els dies amb menys quantitat de descàrregues durant el període de l'any on les tempestes convectives diürnes són més habituals. És a dir, entre el mes d'abril fins el mes de setembre. D'aquesta forma es filtren les precipitacions de tipus càlid ², que no solen estar associades a la convecció humida profunda i presenten un nombre molt menor de descàrregues elèctriques en comparació amb la precipitació de tipus fred (Rigo et al. 2008). Després, es passa el segon filtre, tenint en ment que no ens interessin les tempestes nocturnes, ja que no són objecte d'estudi en aquest treball. D'aquesta forma, ens quedem amb les dades entre les 10 i les 20 UTC. Posteriorment, es prossegueix a un tercer, que consisteix en extreure el primer llamp NT detectat per a cada dia on tenim dades, i els 5 primers en el cas dels NN. Un cop tenim aquest subconjunt de dades, es procedeix a la representació els

² La pluja càlida està definida segons la Societat Meteorològica Americana (AMS 2021) com aquella pluja formada dins un núvol on a tots els nivells la temperatura està per sobre de la isozero, resultat del procés de coalescència de gotes (processos de xoc entre gotes per formar-ne de més grans).

mapes de densitat de llamps (*Probability Density Times Bin Area*), essent en definitiva mapes ceràunics durant el període temporal establert.

Un cop s'han depurat aquestes dades, s'analitza la qualitat del subconjunt de dades finals que s'estan fent servir per construir els mapes de densitat de llamps. En aquest cas, l'únic paràmetre disponible en les dades utilitzades és el semieix major de l'el·lipse de confiança, que està calculat per a cadascuna de les descàrregues registrades, a l'estar íntimament relacionada amb la precisió en la seva localització.

Cal destacar que a menor valor del semieix major mitjà de les descàrregues, la xarxa serà més precisa en el seu conjunt. Una altra variable que és utilitzada per estimar la qualitat de la xarxa de detecció de descàrregues de les dades és la chi-quadrat (Núñez Mora et al. 2019), encara que en aquest cas no està disponible. No s'ha utilitzat pròpiament com un filtre més, però s'ha fent servir per valorar la diferència de qualitat de les dades des d'un punt de vista de distribució espacial.

C. Modelització i postprocessament

Per a la identificació de les zones que afavoreixen l'aparició reiterada i prematura de tempestes s'utilitza un model meteorològic. Llavors, s'ha procedit en primer terme a la instal·lació, compilació i configuració del model WRF-ARW (v4.0) en un HPC (*High Performance Computing*), d'acord amb les indicacions presents en els manuals disponibles de la versió del model emprat (NCAR/UCAR 2020, Wang et al. 2019).

Les simulacions s'assagen fent servir una configuració tal que el domini amb la malla més fina cobreixi Catalunya amb un pas de malla aproximat de 3,3 km. En la Fig. 3 es pot veure acotada la regió d'estudi amb la topografia que fa servir el model. La projecció utilitzada és la cònica conforme de Lambert (LCC, *Lambert conformal conic*), recomanada per a regions que es troben en latituds mitjanes, com és el cas que ens ocupa (ICSM 2020).

Les condicions inicials i de contorn s'han extret a partir de l'ERA5, les reanàlisis del Centre Europeu de Prediccions Meteorològiques a Mitjà Termini (ECMWF, per les seves sigles en anglès) que va substituir l'ERA-Interim a partir del 31 d'agost del 2019. Les dades d'aquest model cobreixen la totalitat de la Terra per mitjà d'una quadrícula d'uns 30 km de costat, resolent l'atmosfera per mitjà de 137 nivells des de la superfície fins a una alçada de 80 km (ECMWF 2019).

Per evitar grans salts en el pas de malla, s'ha efectuat una reducció d'escala amb un factor d'escala d'1/3 mitjançant dos niaments. D'aquesta manera s'assegura que les condicions de contorn pels dominis amb un pas de malla menor presentin un cert detall en els camps meteorològics, evitant que aquests siguin constants.

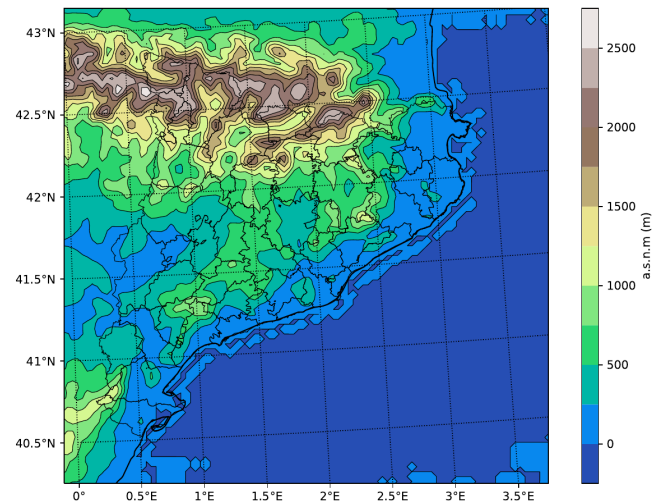


Figura 3: Mapa on es representa la topografia que utilitza el model WRF-ARW en aquest treball.

Llavors, l'esquema de dominis utilitzats consta d'un domini inicial (D01) essent el domini mare o extern amb una pas de malla de 30 km, un segon (D02) resultat del primer niament de 10 km i finalment un tercer (D03) a partir del segon niament de 3,3 km de mida de cel·la de la graella (Fig. 4).

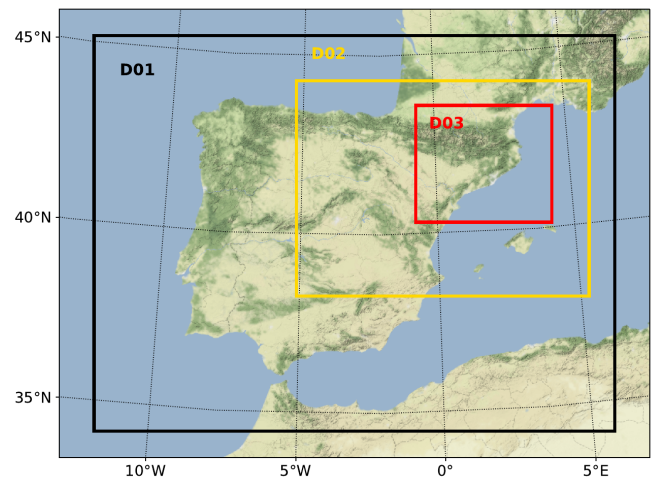


Figura 4: Disseny dels dominis de les simulacions. Es representa el domini extern (D01) i els dominis niats (D02 i D03).

En la vertical es fan servir 38 nivells, mentre que són 4 els utilitzats pel sòl, seguint el recomanat pel manual (Wang et al. 2019). El cim del model se situa a 50 hPa. El pas de temps emprat en el domini utilitzat per analitzar les dades d'interès de sortida és de 20 s. La resta de característiques de configuració dels dominis queda reflectida en la Taula I.

Aquestes simulacions s'han realitzat per a cada dia des de l'abril fins al setembre durant un període de 5

Taula I: Configuracions del domini extern i els niaments utilitzades en les simulacions del WRF-ARW.

Configuració	Domini extern	1r domini niat	2n domini niat
Pas de malla	30 km	10 km	3.33 km
Mida (X,Y,Z)	54,41,38	91,67,38	127,109,38
Pas de temps	180 s	60 s	20 s
Condicions inicials	ERA5 (0.25 ^o x 0.25 ^o)		
Condicions de contorn	ERA5 (0.25 ^o x 0.25 ^o) WRF domini extern WRF 1er domini niat		

anys entre el 2016 i el 2020. Tenint en compte que s'han inicialitzat cadascuna de les simulacions a les 00 UTC pel D01 fins a les 20 UTC. També es té present l'*spin up* del model per tal de l'estabilització dels camps meteorològics i el filtratge de les ones gravitatòries. Pel cas dels dominis niats s'ha començat amb un desfasament de 3 hores, és a dir a les 3 UTC, pel mateix motiu esmentat.

El model s'ha corregut amb el mode no hidroestàtic, utilitzant algunes de les parametritzacions utilitzades habitualment pel Servei Meteorològic de Catalunya en les seves prediccions operatives. En concret, s'han fet servir per parametritzar la convecció i la microfísica de núvols els esquemes de Kain-Fritsch i WSMS respectivament (Mercader et al. 2010). Per a la resta de parametritzacions s'ha configurat emprant el paquet de física CONUS (*Contiguous United States*) que ve per defecte en la configuració del model (Wang 2017). Entre aquestes parametritzacions fixes per defecte, estan incloses: la radiació terrestre (o radiació d'ona llarga), la transferència d'ona curta, la capa fronterera, la capa superficial i la superfície terra/aigua.

Una vegada s'han obtingut les dades de sortida del model, s'ha procedit a extreure les dades de les variables considerades d'interès per tal de dur a terme l'estudi que s'ha proposat. S'han extret diferents variables meteorològiques, tant de forma directa com indirecta. Algunes d'aquestes són les següents: precipitació horària acumulada (desglossada entre la convectiva i la no convectiva; produïda per l'esquema de microfísica de núvols i de convecció de cúmuls respectivament (Rozumalski 2015)), la temperatura i la temperatura del punt de rosada (per als diferents nivells d'interès) o la pressió (també per a diferents nivells). Per fer-ho, s'ha optimitzat el procés a partir d'un *script*, que ha permès l'obtenció de cadascun dels fitxers de sortida del model per al domini amb la malla més fina.

És important matisar que no és senzill diferenciar les precipitacions d'origen convectiu i les que no ho són a partir de les dues variables de sortida corresponents a la precipitació acumulada horària. Això és pel fet que aquests esquemes parametritzen processos físics que estan íntimament lligats entre sí. Per tant, encara que en les guies utilitzades s'associa un tipus de precipitació a cadascuna de les variables, s'ha pres en el present treball com una mera primera aproximació de caràcter orientatiu.

A part de la consideració de les parametritzacions està el fet de la resolució explícita de les equacions físiques, que pot acabar donant també precipitacions encara que el model s'hagi corregut en mode no hidroestàtic. Tenint en compte les escales en les quals s'ha corregut el WRF-ARW, requerirà d'una anàlisi de l'efecte de la tercera equació del moviment en el desenvolupament de la convecció per a les escales en què s'està corrent el model.

Posteriorment, s'han filtrat les dades, per tal de localitzar la precipitació associada a les tempestes diürnes dins dels mesos de l'any que s'han establert prèviament. Aquest procés també ha estat optimitzat i s'han considerat diferents factors, per tal de descartar les precipitacions que no tinguessin un possible origen convectiu. El primer filtre ha estat horari, restringint les dades entre les 10 i les 20 UTC, tal com es va fer per a les dades obtingudes de la XDDE. L'objectiu que es cercava en aquest cas era el de centrar-nos en la precipitació diürna associada a la convecció profunda, l'arrelada a la superfície fruit de l'escalfament solar. Després, s'ha establert un llindar de precipitació d' 1,0 mm, que ha funcionat com un segon filtre, descartant valors negligibles generats pel model, que no podrien ser mesurats per una estació meteorològica. Finalment, s'ha optat pel càlcul de dos índexs d'inestabilitat tèrmics associats a la formació de tempestes, constituint el tercer filtre. Aquests han estat l'índex K (KI, *K-Index o George's Index*) i el Total de totals (TTI, *Total Totals Index*), essent índexs utilitzats per a latituds mitjanes (Davison i Gálvez 2016). Els llindars que s'han fet servir per a aquest últim filtre, han estat els tabulats per a les nostres latituds (EUMeTrain 2011, Miller 2015).

Convé fer ressaltar que entre els filtres que s'han fet servir no està l'ús de l'Índex Potencial de Llamps (*The Lightning Potential Index, LPI*). Aquest és un índex experimental que mesura la generació i separació de càrregues que provoquen els llamps en les tempestes convectives. A diferència dels índexs clàssics associats a la possibilitat de formació de tempestes i de temps sever en general, com alguns que s'han esmentat anteriorment com a filtre, no tenen un origen termodinàmic sinó que es calculen a partir dels camps associats a la microfísica del model meteorològic (Lynn i Yair 2010). És per tant un índex directe, en contraposició als índexs termodinàmics clàssics. Tot i això, encara que resulta ser un índex experimental, ja s'ha fet servir per a diferents

anàlisis de simulacions de casos d'estudi en la conca mediterrània, incloent Catalunya (Yair et al. 2010). En Yair et al. (2010), s'investiga el potencial d'aquest índex per predir la densitat de llamps a través d'un model meteorològic d'alta resolució en comparació a l'activitat de descàrregues NT. Concloent que el LPI resulta ser superior als índexs termodinàmics com el KI, utilitzat com a filtre. Els detalls dels filtres descrits estan recollits a la Taula II.

Taula II: Variables utilitzades com a diferents condicions per tal de filtrar les dades obtingudes a partir del model meteorològic WRF-ARW.

Filtre	Variable	Condicció aplicada
1r	UTC (h)	$10 \leq h \leq 20$
2n	Precipitació (mm)	$P > 1.0$
3r	Total de Totals (K)	$T \geq 44$
4t	Índex K (K)	$T \geq 20$

Després, un cop s'ha obtingut el subconjunt de dades filtrades, s'han acotat per a cada un dels dies on el model ha simulat precipitació. Obtenint d'aquesta forma les localitzacions on s'ha predit la primera precipitació del dia dins de l'horari filtrat. Després, s'ha representat els mapes de densitat de forma anàloga al procés descrit dins de la metodologia per a les dades de la XDDE.

Finalment, s'han representat i analitzat diferents variables meteorològiques per tal de comprendre millor les causes físiques que hi ha darrere dels *nius de tempesta* associats a convecció profunda, que s'han aconseguit copsar amb els diferents mapes de densitat de primera precipitació. En aquest punt, s'ha descartat l'anàlisi d'índexs des d'un punt de vista espacial, ja que no ens aporta informació de la física que hi ha darrere dels processos meteorològics.

III. RESULTATS I DISCUSSIÓ

A. Localització de *nius de tempesta*

1. Patró climatològic

A partir de les dades del XDDE es genera un patró climatològic (encara que no és climatològicament significatiu ³) pel territori d'estudi tal com queda recollit

en la Fig. 5. De manera que ens dona informació de la localització dels possibles *nius de tempesta*.

Destaca l'alta densitat de la zona més septentrional de la comarca del Ripollès, amb una densitat de llamps superior a 0,6. És per tant el millor candidat a ser una zona propensa a la convecció profunda. A certa distància d'aquesta àrea, es troben altres zones on la densitat resulta molt superior a la mitjana, com són: el sud del Ripollès, el nord d'Osona i la comarca del Vallespir dins del departament francès d'Occitània (totes aquestes àrees amb una densitat superior a 0,4). Amb una densitat menor a les esmentades, però per sobre de 0,35 trobem punts de la Ribagorça (pertanyent a la Comunitat Autònoma de l'Aragó), l'àrea oriental de l'Alt Berguedà, l'Alta Cerdanya (dins del departament francès d'Occitània).

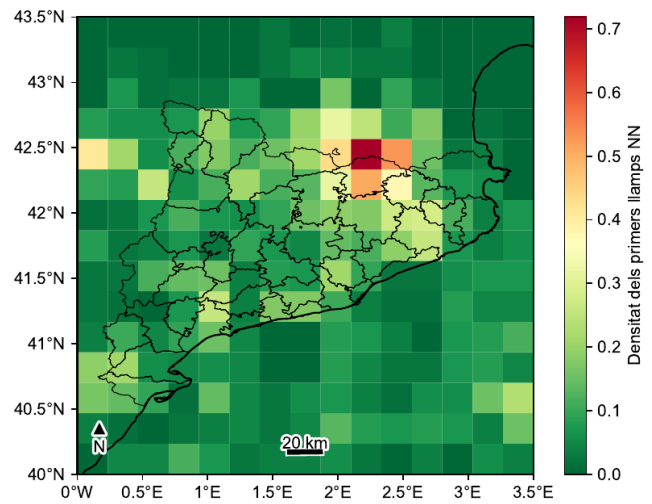


Figura 5: Mapa de la densitat de descàrregues elèctriques dels primers 5 llamps NN diaris.

Aquests resultats són compatibles amb els llamps NT, adjuntats en l'apèndix, on segueixen apareixent les diferents localitzacions a excepció de l'Alta Cerdanya on la densitat és sensiblement menor i la localització de les Muntanyes de Prades amb una densitat major respecte el mapa ceràunic amb els NN.

Per tant, s'han identificat possibles candidats a ser zones propenses a la formació de tempestes, quedant reflectides en la Fig. 6. S'aprecia com totes elles comparteixen el fet que estan localitzades en zones elevades. Tot i això, les ubicacions considerades no s'estenen de forma uniforme per a les estructures de relleu associades a serralades, sinó que queden restringides a certes zones, com és el cas del Pirineu i Prepirineu

³ En aquest estudi no es compleix el criteri clàssic de l'Organització Mundial de la Meteorologia (OMM), que estableix un període

de 30 anys per l'estudi de climatologies (World Meteorological Organization 2017).

oriental. En particular destaca la diferència amb l'àrea occidental. Aquest resultat és compatible amb els treballs previs realitzats pel SMC (Pineda et al. 2011, Servei Meteorològic de Catalunya 2019), tot i que les dades mostrades en aquests van més enllà dels mesos estudiats. També l'és en l'estudi climatològic de descàrregues elèctriques de Núñez Mora et al. (2019) per a l'època estival; on fan servir dades d'impactes de llamps de la xarxa de l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET). A més a més, en aquest últim estudi es conclou una major densitat en les Muntanyes de Prades, fet que en la mitjana anual climatològica del SMC no queda reflectit.

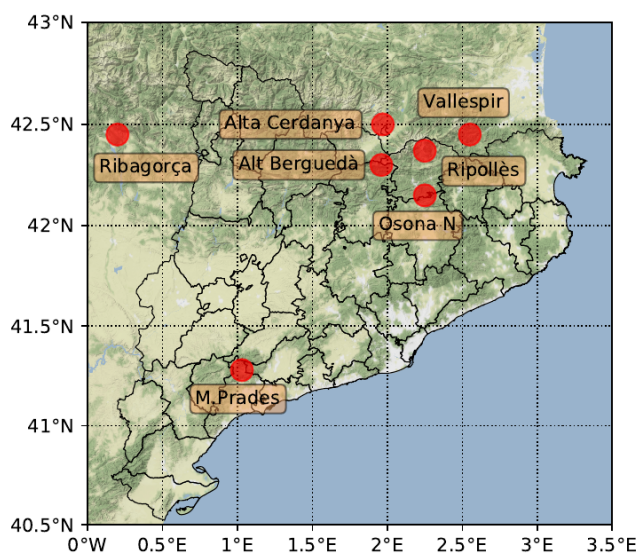


Figura 6: Localització dels possibles *nius de tempesta* a partir de les dades utilitzades de la XDDE.

Un cop descrita la distribució de la densitat pel territori, es pot analitzar la distribució temporal diària. D'aquesta forma, es pot tenir una idea de l'origen físic d'aquestes tempestes. A la Fig. 7 es visualitza com la major part de les descàrregues elèctriques NN fora de les zones identificades es produeix entre les 10 i les 12 UTC. En particular en tota la Depressió central on la densitat registrada se situava per sota del 0,2. També succeeix aquest fet mar endins, on els llamps NN són dels més primerencs. En canvi, en els possibles *nius de tempesta* que s'han identificat, es produeixen les descàrregues també durant la resta del període temporal estudiat. Aquest fet és un indicador de l'origen de les tempestes que es produeixen. A més a més, molts d'aquests impactes no vénen acompanyats d'altres que s'hagin produït durant un període curt (menys d'una hora). És a dir, no formen clústers aparentment, en contraposició de la DMC està associada a una major quantitat de llamps NN.

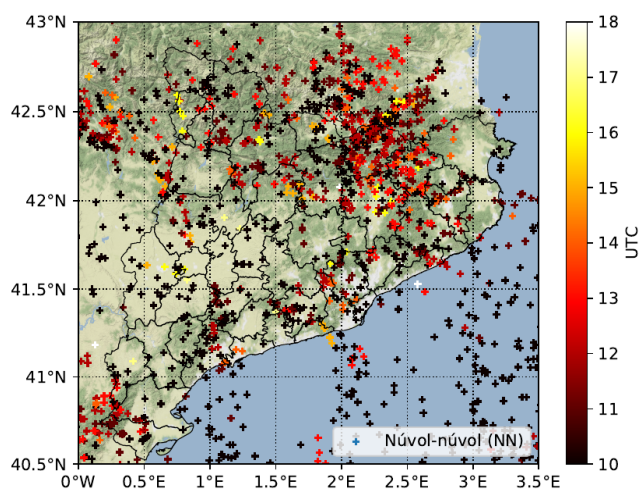


Figura 7: Ubicació dels impactes dels primers llamps NN en funció de l'hora en la qual s'han produït.

Per acabar, ens podem plantejar el fet que certes descàrregues detectades per la XDDE poden ser menys precisos. Especialment, si es té en compte que les àrees identificades es localitzen en zones on la topografia resulta ser complexa. Si bé és cert que en les conclusions del mateix estudi de Pineda et al. (2011) es fa referència a una gran eficiència de la xarxa, inclosa la zona del Pirineu oriental, no és així en el Pirineu axial més occidental, com pot ser la Ribagorça aragonesa.

Llavors, tenint en compte els resultats annexats (Fig A.1) es pot concloure que la gran majoria dels impactes detectats que s'han utilitzat presenten un semieix de l'el·lipse petit, amb petites variacions. Altrament, les diferències en el cas dels NN són substancialment majors. Destacant la zona de la Ribagorça i la cara nord del Pirineu oriental, on aquest paràmetre triplica la mitja d'altres zones com la Depressió Central. En definitiva, aquest fet s'haurà de considerar a l'hora de comprar les dades amb les obtingudes a través del model meteorològic.

2. Patró geogràfic del model

Utilitzant el model meteorològic WRF-ARW es representen les densitats de la primera precipitació per a diferents casos, per tal d'obtenir un patró geogràfic que sigui comparable amb els patrons obtinguts amb les dades experimentals de descàrregues elèctriques.

A la Fig. 8.a es tenen en compte les diferents contribucions de la primera precipitació acumulada en el domini de malla més fina. S'extreu d'aquest patró diferents estructures amb màxims de densitat i d'altres on resulten ser mínims. Pel que fa als màxims, es localitzen en diferents indrets: el sector oriental del Pirineu i Prepirineu, la Ribagorça aragonesa i l'Alta Ribagorça i per últim apareix una estructura a la zona més septentrional del Pirineu occidental. En canvi, en el

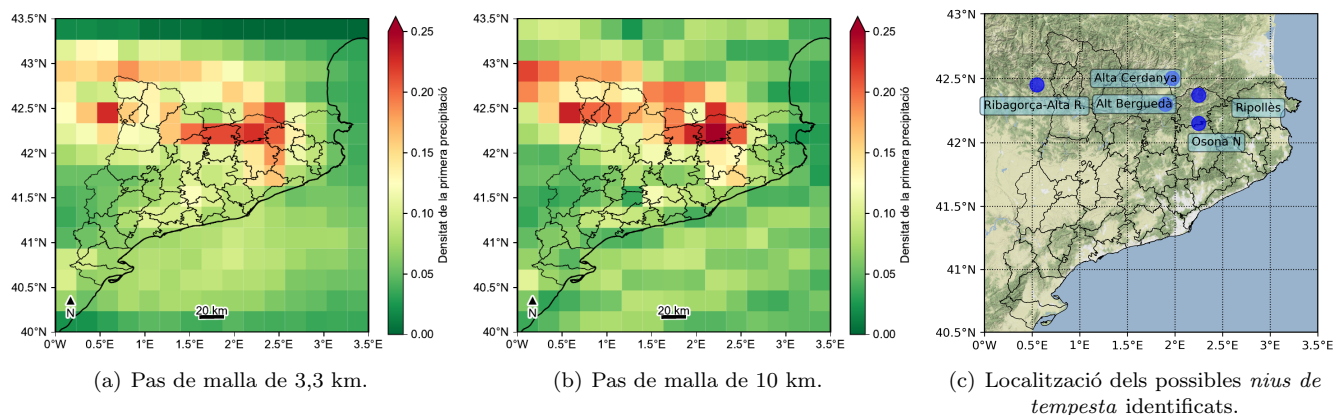


Figura 8: Resultats del patró geogràfic resultant del model. Es representa la densitat de la primera precipitació per a diferents passos de malla. Entès com la quantitat de dies en els que s'ha registrat la primera precipitació acumulada entre el nombre total de dies utilitzats i entre l'àrea de la cel·la en qüestió. A més a més, es localitzen els possibles *nius de tempesta* tenint en compte les dades del patró geogràfic, les dades del XDDE i els resultats de treballs previs de diferents agències meteorològiques.

cas del mínims s'identifiquen a la Depressió Central i a la Costa Brava.

Per tal de comprovar que no s'hagi comès un doble comptatge, s'analitza la densitat de primera precipitació pel pas de malla de 10 km (Fig. 8.b). No hi ha grans diferències amb el de 3,3 km. Per consegüent, es pot deduir que l'efecte de la tercera equació del moviment en el desenvolupament de la convecció, per a aquesta escala, resulta ser irrellevant. Pel que la major part de la precipitació recollida en el model es genera per mitjà de la convecció implícita. Les diferents contribucions de les parametritzacions queden reflectides en les Fig. A.2, dins de l'apèndix.

Amb el pas de malla de 10 km, el patró obtingut resulta més semblant a l'aconseguit amb les dades de la XDDE. Amb màxims al Ripollès, nord d'Osona, l'Alta Ribagorça (en aquest cas, més desplaçat cap a l'est), l'Alta Cerdanya i l'Alt Berguedà. Ambdós mantenen l'estructura al Pirineu occidental, fet que recull parcialment en altres estudis (Météo France 2021, Núñez Mora et al. 2019). Tot i això, resulta difícil de ser utilitzat per determinar *nius de tempesta* en aquesta zona. En aquest sentit, els resultats obtinguts sense utilitzar el filtre dels índexs termodinàmics (A.3 a l'apèndix), augmenten considerablement l'extensió de l'alta densitat en l'estructura més nord-occidental. Pel que, molt possiblement aquestes primeres precipitacions no estan associades a la convecció humida profunda.

B. Anàlisi dels factors meteorològics

Un altre punt importat són els factors meteorològics que afavoreixen al fet que es produeixi la primera precipitació en una localització determinada. En aquest apartat s'analitza per al *niu de tempesta* més important

identificat, el Ripollès. I de forma més general la zona dels Pirineus Orientals en conjunt. Per tal d'identificar els mecanismes mesoescalars se seleccionen aquells dies en condicions anticiclòniques a escala sinòptica i on la major part de la precipitació es concentra en l'àrea esmentada. En nivells alts, a 500 hPa, estan més o menys afavorits per estructures sinòptiques com són el cas dels tàlvegs o les depressions aïllades a nivells alts (DANA), depenent de la jornada en qüestió. En treballs previs, com el realitzat per Callado i Pascual (2005), González (2019), se suggereixen dos elements claus: l'orografia complexa de la regió d'estudi i la proximitat al mar. A partir, d'aquí es justifica la freqüència més gran de tempestes en detriment d'altres descrivint aquests mecanismes. Si bé és cert que l'orografia pot actuar com un factor dispar i la proximitat al mar com una aportació addicional d'humitat a la zona en qüestió, se cerquen altres factors que puguin suggerir l'aparició de tempestes més enllà d'aquestes idees esmentades. A l'hora de buscar aquests mecanismes, s'ha de tenir present que la interacció entre l'orografia i la precipitació a petita escala és complicada. González (2019) cita fins a 12 mecanismes que afecten els núvols de precipitació a causa de la interacció amb l'orografia.

Llavors, a l'hora d'analitzar la jornada 30 de juliol del 2018, la primera precipitació queda situada al nord de la comarca del Ripollès, deguda principalment a zones de convergència local on l'orografia té un paper important (Fig. 9.a). Cal mencionar també, l'existència d'una dèbil component humida en el nivell de 1000 hPa. A més a més, aquesta zona presenta abans de la precipitació una temperatura en el nivell de 700 hPa major que d'altres properes (Fig. 9.b) associat al fenomen de la font elevada de calor en altura, afavorint la formació de tempestes en contraposició a aquelles ubicacions on no està present. És a dir, els cims

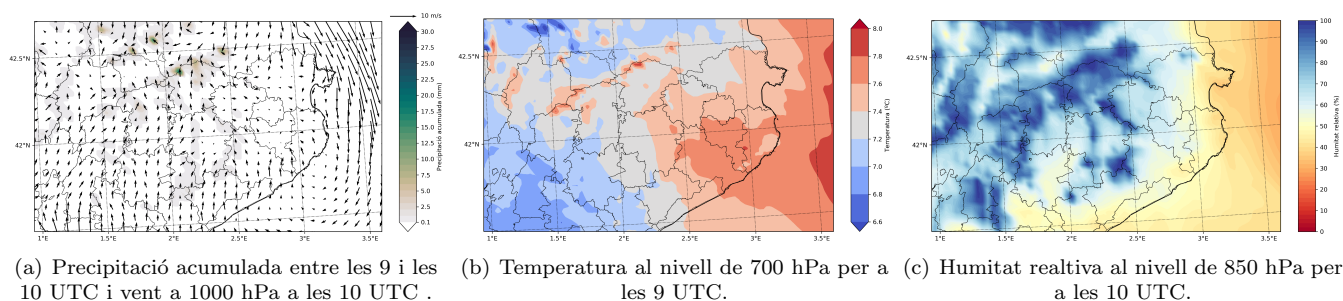


Figura 9: Situació mesoescalar del dia 30 de juliol del 2018 a partir de les dades del WRF-ARW. Les variables meteorològiques representades són les següents: la direcció i el mòdul del vent representats per fletxes negres sobre el mapa de la precipitació acumulada horària (mm), la temperatura per el nivell de 700 hPa ($^{\circ}\text{C}$) i la humitat relativa per el nivell de 850 hPa (%). Els mapes complementaris es mostren a l'apèndix de la Fig. A.3.

dels sistemes muntanyosos les superfícies isotermes es presenten més atapeïdes durant el dia; augmentant conseqüentment el gradient vertical de temperatures i disminuint l'estabilitat atmosfèrica. A banda d'això, s'aprecia en la Fig. 9.c com la humitat relativa a 850 hPa és molt alta en diferents indrets, però és allà on es combinen els diferents factors esmentats on es produeix més precipitació acumulada horària. La quantitat d'aigua precipitable disponible associada a la proximitat del mar, no sembla ser un factor crucial per determinar la zona de primera precipitació (veure la Fig. A.3).

Aquests mecanismes esmentats per aquesta jornada i per aquesta zona concreta es repeteixen recurrentment. En la Fig. A.3 s'adjunten dos dies més, que serveixen per exemplificar aquest patró descrit. On tornen a aparèixer una major temperatura en les zones elevades on comença la precipitació, i una disminució posterior, un cop ja s'ha iniciat. En tots els casos apareix la zona de convergència al nivell de 1000 hPa associada a l'orografia. També es detecten brises marines que recorren diferents camins fins a l'àrea on acaba precipitant. Depenent de com siguin, el factor de la brisa marina presenta una major o menor rellevància. Però en qualsevol cas, acaba sumant com un factor mesoescalar més. En aquest sentit la importància de les valls dels rius Ter i Fluvià, així com els seus afluents, juguen un paper a l'hora de transportar i canalitzar l'aportament d'humitat a nivells baixos.

IV. CONCLUSIONS

En aquest treball s'ha pogut constatar que hi ha zones a Catalunya i comarques limítrofes en les quals s'afavoreix la formació de tempestes associades a la convecció humida profunda per sobre d'altres zones. Aquestes localitzacions, denominades *nius de tempesta*, són les següents: l'Alt Berguedà, l'Alta Cerdanya, l'Alta Ribagorça, el nord d'Osona, la Ribagorça aragonesa i el Ripollès. És aquesta última comarca la que presenta una major freqüència de formació de tempestes convectives,

emmarcada en l'àrea geogràfica dels Pirineus Orientals.

A aquesta conclusió principal s'ha arribat a partir del tractament de dades de descàrregues elèctriques de la xarxa operativa (XDEE) del SMC, que ens ha permès determinar els *nius de tempesta* formant un patró climatològic. Posteriorment, hem comprovat que aquest patró és reproduïble mitjançant un model de mesoescala utilitzant una configuració apropiada per a la convecció humida profunda, fet que ens ha permès indagar en els mecanismes responsables de la distribució geogràfica d'aquestes primeres precipitacions convectives.

Respecte a la identificació de mecanismes se n'ha fet només una temptativa per tal de donar una explicació de la precipitació convectiva en la zona dels Pirineus Orientals. Aquests mecanismes són la convergència local en nivells baixos degut a l'orografia i el reforçament de l'aportament d'humitat per mitjà de les brises marines canalitzades pel terreny a causa de la proximitat al mar Mediterrani. A més a més, s'insinua el fenomen de la font elevada de calor com un mecanisme a tenir molt en compte a l'hora de valorar les raons de l'aparició reiterada i prematura de tempestes.

De cara a treballs futurs seria interessant seguir en la investigació dels mecanismes, fins i tot arribar a analitzar a una escala local. També resulta cabdal l'estudi de la microfísica de núvols en tots aquests processos físics per a obtenir una correcta interpretació de les simulacions.

AGRAÏMENTS

En primer terme vull agrair al meu tutor, en Bernat Codina, tots els seus suggeriments per tal de conduir i millorar aquest treball. També vull donar les gràcies a la Sónika Leconte, per l'ajuda rebuda per la part d'il·lustració. Per acabar, reconèixer el suport que he tingut d'amics com de familiars.

REFERÈNCIES

- AMS (2021), 'Warm rain - Glossary of Meteorology', URL: <http://bit.ly/3rqJNoJ>. Últim accés: 20-01-2021.
- Callado, A. i Pascual, R. (2005), 'Diagnosis and modelling of a summer convective storm over Mediterranean Pyrenees', *Advances in Geosciences*, doi:10.5194/adgeo-2-273-2005.
- Coiffier, J. (2011), *Fundamentals of Numerical Weather Prediction*, Cambridge University Press, doi: 10.1017/CBO9780511734458.
- Davison, M. i Gálvez, J. (2016), 'Índices de Estabilidad', WPC International Desks, URL: <https://bit.ly/36GG52n>. Últim accés: 10-01-2021.
- ECMWF (2019), 'ERA5', URL: <http://bit.ly/3oTNPEg>. Últim accés: 10-01-2021.
- EUMeTrain (2011), 'Stability Indices', URL: <http://bit.ly/3pSxiSD>. Últim accés: 10-01-2021.
- Fleagle, R. G. (1949), 'The Audibility of Thunder', *The Journal of the Acoustical Society of America* **21**(4), 411–412, doi:10.1121/1.1906528.
- González, S. (2019), 'Precipitació i circulacions mesoescalars en zones d'orografia complexa', Universitat de Barcelona, URL: <http://hdl.handle.net/2445/142280>.
- ICSM (2020), 'Commonly Used Map Projections', URL: <http://bit.ly/3aB2hMy>. Últim accés: 28-11-2020.
- Jeworrek, J., West, G. i Stull, R. (2019), 'Evaluation of cumulus and microphysics parameterizations in WRF across the convective gray zone', *Weather and Forecasting*, doi:10.1175/WAF-D-18-0178.1.
- Lluís, J. (2007), *Geografia de Catalunya*, Cavall berrat, Publicacions de l'Abadia de Montserrat.
- Lynn, B. i Yair, Y. (2010), 'Prediction of lightning flash density with the WRF model', *Advances in Geosciences*, doi:10.5194/adgeo-23-11-2010.
- Markowski, P. i Richardson, Y. (2011), *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*, Advancing Weather and Climate Science, Wiley.
- Martín León, F., Elizaga Rodríguez, F., Carretero Porris, O. i Sanambrosio Beirán, J. I. (2007), 'Diagnóstico y predicción de la convección profunda', Instituto Nacional de Meteorología, URL: <http://hdl.handle.net/20.500.11765/5112>. Nota técnica STAP 35, Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción.
- Mercader, J., Codina, B., Sairouni, A. i Cunillera, J. (2010), 'Resultats del model meteorològic WRF-ARW sobre Catalunya, utilitzant diferents parametritzacions de la convecció i la microfísica de núvols', *Tethys, Revista de meteorologia i climatologia mediterrània* **7**, 77–89, doi: 10.3369/tethys.2010.7.07.
- Miller, S. (2015), *Applied Thermodynamics for Meteorologists*, Cambridge University Press.
- Météo France (2021), 'Les orages', URL: <http://bit.ly/205hoWJ>. Últim accés: 15-01-2021.
- NCAR/UCAR (2020), 'How to Compile WRF: The Complete Process', URL: <http://bit.ly/36LaE60>. Últim accés: 22-11-2020.
- Núñez Mora, J. Á., Riesco Martín, J. i Mora García, M. A. (2019), 'Climatología de descargas eléctricas y de días de tormenta en España', Agencia Estatal de Meteorología, URL: <http://hdl.handle.net/20.500.11765/10982>.
- Palmer, T. i Hagedorn, R. (2006), *Predictability of Weather and Climate*, Cambridge University Press, doi: 10.1017/CBO9780511617652.
- Pineda, N., Soler, S. T. i Vilaclara, E. (2011), 'Aproximació a la climatologia de llamps a Catalunya: anàlisi de les dades de l'SMC per al període 2004-2008', Generalitat de Catalunya, Departament de Territori i Sostenibilitat, URL: <https://bit.ly/3oQFqRZ>. Nota d'estudi del Servei Meteorològic de Catalunya, núm. 73.
- Rigo, T., Pineda, N. i Bech, J. (2008), 'Estudi i modelització del cicle de vida de les tempestes amb tècniques de teledetecció', Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge, URL: <https://bit.ly/3tvfzm9>. Nota d'estudi del Servei Meteorològic de Catalunya, núm. 72.
- Rozumalski, R. (2015), 'AppendixF–A Summary of Precipitation Fields in the UEMS', URL: <https://go.nasa.gov/2NZvPvt>. Últim accés: 10-01-2021.
- Servei Meteorològic de Catalunya (2019), 'Xarxa de Detecció de Descàrregues Elèctriques atmosfèriques del Servei Meteorològic de Catalunya', URL: <https://bit.ly/3rq0e11>. Resum de l'annualitat 2019.
- Wang, W. (2017), 'WRF: More Runtime Options', WRF Tutorial, UNSW, Sydney, Australia, 2017, URL: <https://bit.ly/3oS14W4>.
- Wang, W., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., Kavulich, M., Keene, K., Rizvi, J. M. S., Zhang, X., chuan Lin, H., Berner, J., Munoz-Esparza, D., Reen, B., Ha, S. i KateFossell (2019), 'ARW Version 4 Modelling System User's Guide', URL: <https://bit.ly/3cGs0ux>. Últim accés: 02-01-2021.
- World Meteorological Organization (2017), *WMO guidelines on the calculation of climate normals*, World Meteorological Organization Geneva, Switzerland.
- Yair, Y., Lynn, B., Price, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Morin, E., Mugnai, A. i Del Carmen Llasat, M. (2010), 'Predicting the potential for lightning activity in Mediterranean storms based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model dynamic and microphysical fields', *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, doi: 10.1029/2008JD010868.

APÈNDIX A: FIGURES COMPLEMENTÀRIES

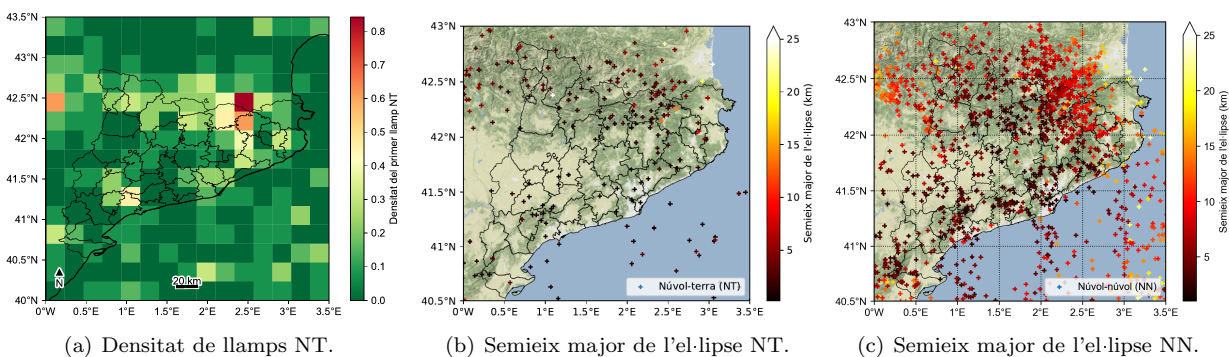


Figura A.1: Resultats addicionals com a resultat de l'anàlisi de les dades de llamps de la XDDE.

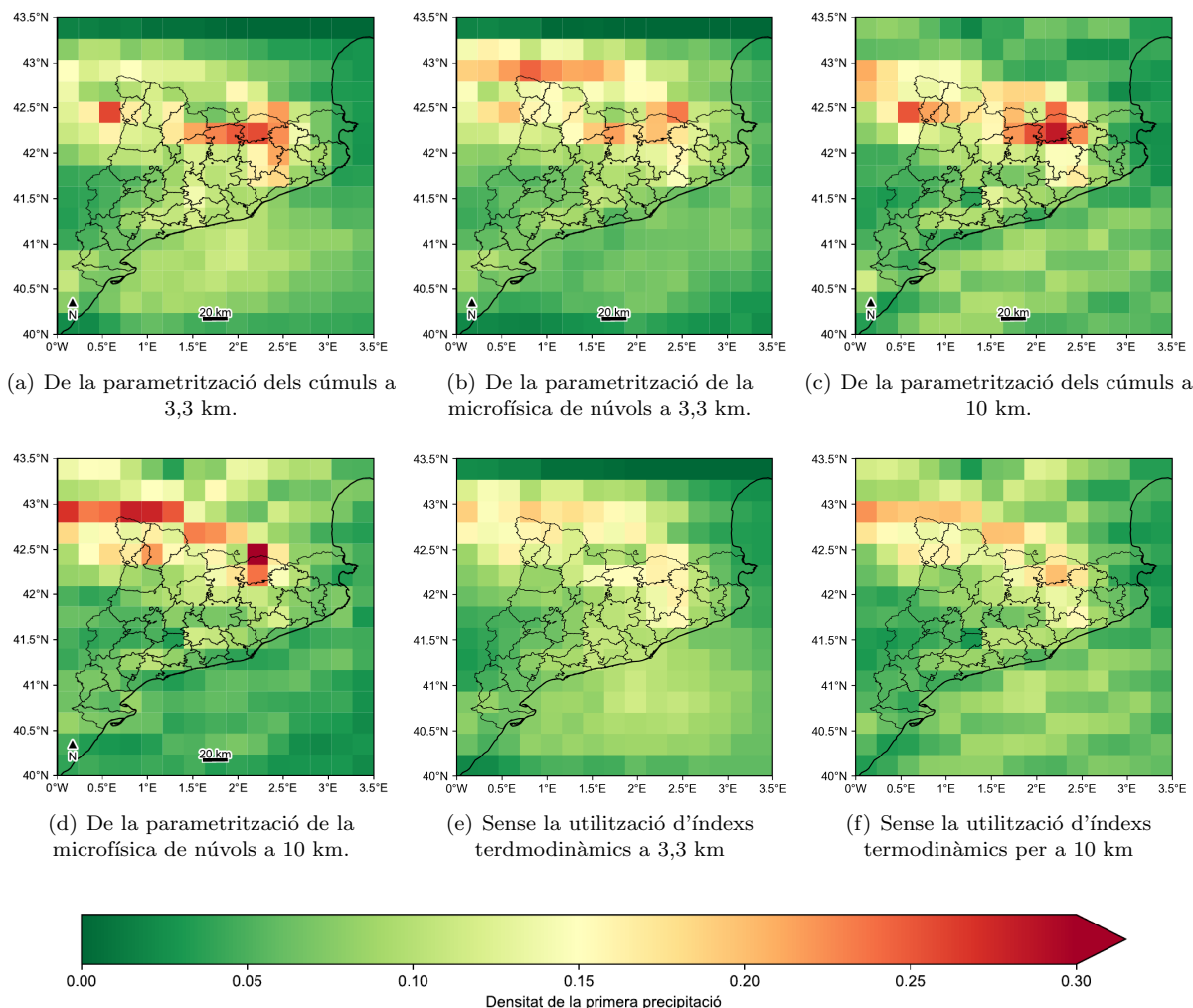
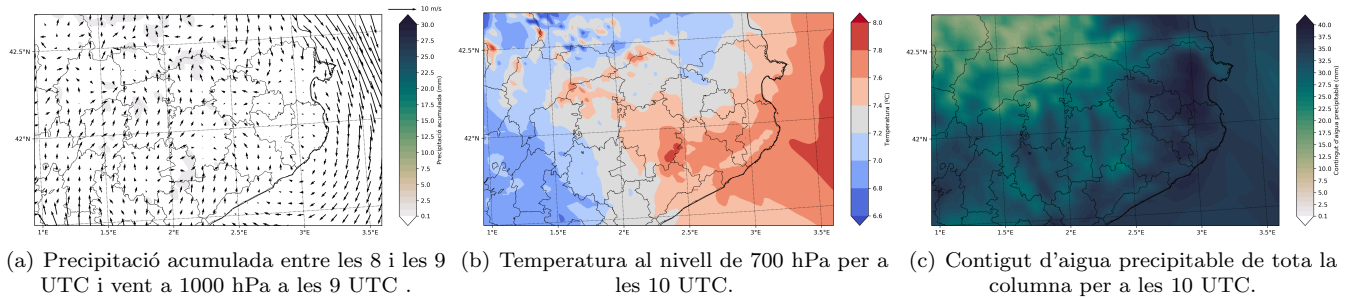
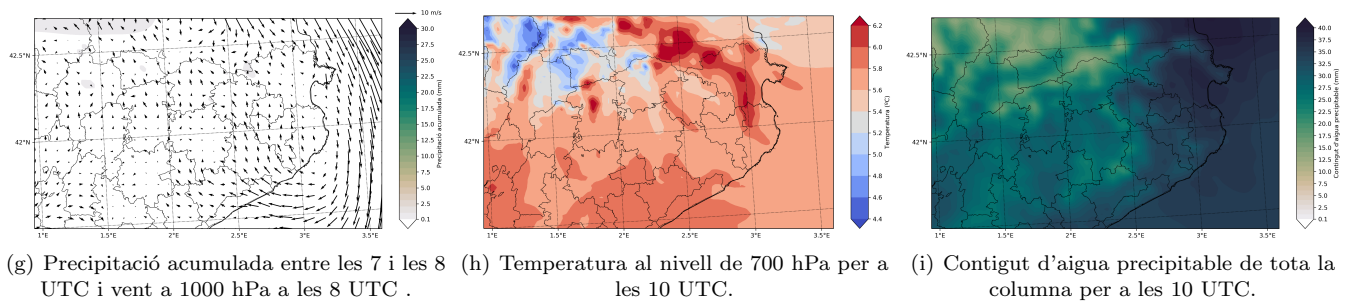
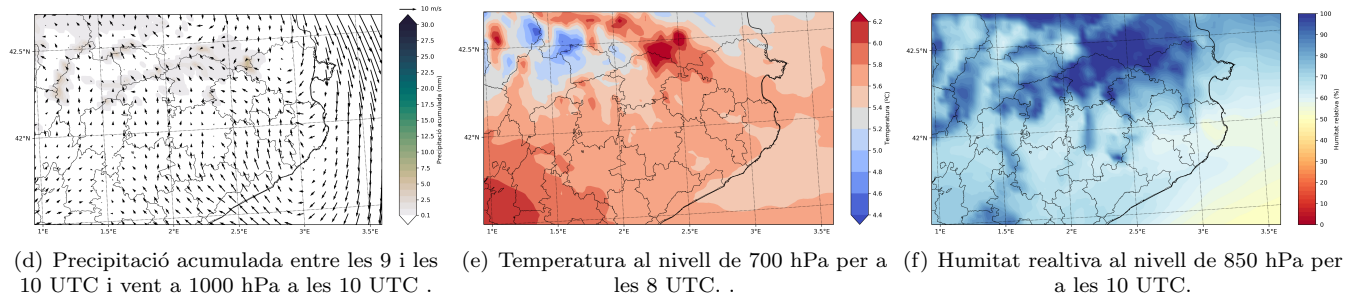


Figura A.2: Densitats de la primera precipitació en funció de les diferents variables de precipitació acumulada del WRF-ARW per a 10 i 3,3 km per a diferents filtres utilitzats.

30/07/2018



02/07/2016



15/08/2020

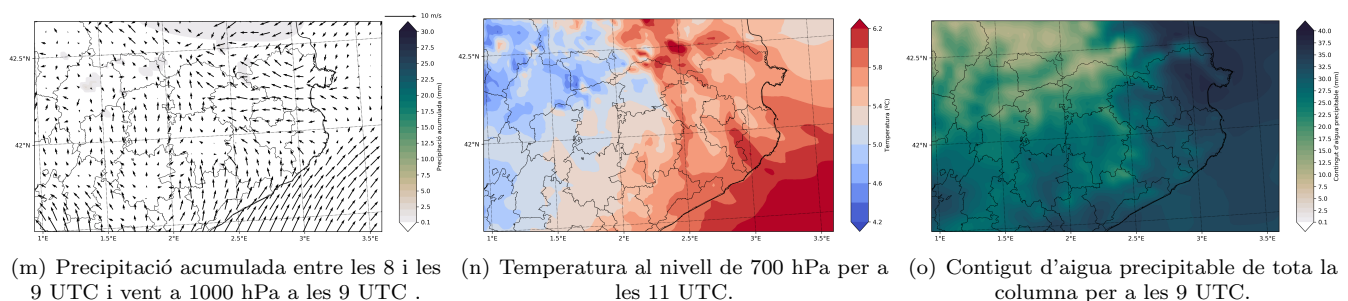
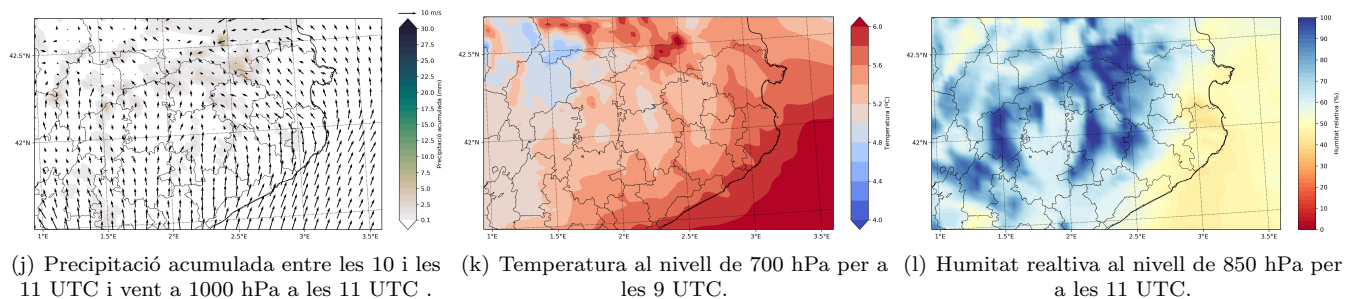


Figura A.3: Situació mesoescalar per a diferents dies per mitjà de les variables del WRF-ARW: la direcció i el mòdul del vent representats per fletxes negres sobre el mapa de la precipitació acumulada horària (mm), la temperatura per el nivell de 700 hPa ($^{\circ}\text{C}$), la humitat relativa per el nivell de 850 hPa (%) i contingut d'aigua precipitable (mm).